

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201710013



带脱空的钢管混凝土短柱 受剪性能有限元分析

王兰^{1,3}, 叶勇^{1,2}, 郭子雄^{1,2}, 王海峰^{1,2}

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021;

3. 黎明职业大学 土木建筑工程学院, 福建 泉州 362000)

摘要: 基于合理的材料本构模型和边界条件,考虑外钢管与核心混凝土之间的组合作用,建立带脱空的钢管混凝土(CFST)短柱在压剪受力状态下的有限元分析模型(FEM).研究脱空率、剪跨比和轴压比对试件受剪性能的影响,提出考虑脱空率及轴压比影响的带脱空钢管混凝土受剪承载力简化计算模型.结果表明:脱空削弱了 CFST 柱在弹塑性工作阶段的受剪性能,且降低了其抗剪承载力;随着剪跨比增加,脱空对试件在纯剪及压剪作用下的抗剪承载力影响降低;当脱空率小于 0.2%时,随着轴压比的增加,试件抗剪承载力线性增长.

关键词: 钢管混凝土;受剪性能;脱空;轴压比;有限元

中图分类号: TU 398

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2018)02-0179-07

Influence of Gap on Mechanical Performance of CFST Members Subjected to Combined Axial Compression and Shear Force

WANG Lan^{1,3}, YE Yong^{1,2}, GUO Zixiong^{1,2}, WANG Haifeng^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory for Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Xiamen 361021, China;

3. Department of Civil and Architectural Engineering, Liming Vocational University, Quanzhou 362000, China)

Abstract: A finite element model (FEM) of concrete-filled steel tubular (CFST) member was established based on proper constitutive relation and boundary conditions. The composite actions between the outer steel tube and core concrete was taken into account, and a gap between the core concrete and steel tube was introduced into the FEM. Effect of the gap ratio, span-to-depth ratio, and axial compression ratio on the shear behavior of CFST members under combined axial compression and shear force was studied. A simplified model considered the effects of the gap ratio and axial compression ratio was proposed to predict the shear strength of CFST members with a gap. The numerical study indicates that the existence of the gap reduced the shear strength of the members on the elastic-plastic stage, and decreases the ultimate shear strength of the members; with the increase of the span-to depth ratio, the influence of the gap on the shear strength decreases. When the gap ratio is less than 0.2%, the shear strength increases with the increase of the axial compression ratio.

收稿日期: 2017-10-30

通信作者: 郭子雄(1967-),男,教授,博士,主要从事工程结构抗震防灾的研究. E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金面上资助项目(2016J01241);福建省高校青年自然科学基金重点资助项目(JZ160410);福建省中青年教师教育科研项目(JAT171081)

Keywords: concrete-filled steel tubular; shear behavior; gap; axial compression ratio; finite element

钢管混凝土组合结构经过几十年的发展,已在土木工程领域中得到广泛应用^[1-3].然而,实际工程中,因混凝土浇筑质量或养护方式不当等原因,导致钢管与混凝土间形成脱空缺陷^[4-5],对构件及结构受力性能产生不同程度影响.近几年,学者研究了脱空对钢管混凝土结构受力性能的影响.杨世聪等^[5]开展不同脱空率条件下圆钢管混凝土短柱的轴压性能试验.刘夏平等^[6]对具有不同脱空率的圆钢管混凝土短柱进行偏心受压试验.Liao等^[4,7]进行圆钢管混凝土轴压试件和纯弯试件的试验研究和数值模拟分析,提出不同脱空类型和脱空率时,钢管混凝土构件承载力和刚度的折减系数.叶勇等^[8]对考虑脱空的方钢管混凝土短柱进行轴压性能的有限元分析.Han等^[9]开展带环形脱空钢管混凝土柱偏压性能的试验及有限元分析研究,提出相应的承载力计算公式.以上研究表明:当脱空缺陷达到一定程度时,将对钢管混凝土构件的受力性能产生严重不利影响.已有研究主要集中在脱空对钢管混凝土轴压和偏压性能的影响,而对带脱空受剪构件的研究则鲜有报道.鉴于此,前期已开展脱空对圆钢管混凝土纯剪切作用下的受剪性能影响分析^[10].为进一步研究脱空对钢管混凝土构件在压剪共同作用下受剪性能的影响,本文建立带脱空的钢管混凝土受剪构件有限元分析模型,研究脱空率、剪跨比和轴压比对其受剪性能的影响,并提出考虑脱空率及轴压比影响的带脱空钢管混凝土受剪承载力计算方法.

1 有限元建模与验证

1.1 试件材料模型和单元选取

钢材采用等向强化塑性模型,满足 Von Mises 屈服准则,其应力-应变关系采用二次塑流模型^[1].钢管采用 4 节点减缩积分格式的壳单元(S4R)模拟.在壳单元的厚度方向,采用 9 个 Simpson 积分点.核心混凝土采用 ABAQUS 程序提供的混凝土塑性损伤模型, p - q 平面高围压情况下的膨胀角取 40° ^[11];为了提高计算的收敛性,粘塑性系统松弛时间的粘性系数取 1×10^{-6} ;其他参数取缺省值.核心混凝土的单轴受压应力-应变关系采用韩林海模型,受拉软化行为采用混凝土受拉应力-断裂能模型^[1].核心混凝土和加载端板采用 8 节点减缩积分格式的三维实体单元(C3D8R)进行模拟.

1.2 网格划分

采用细化网格法进行网格实验,确定合理的单元网格,有效地避免明显的沙漏现象.钢管与混凝土的接触关系中,钢管表面设置为主面,混凝土表面为从面,且从面网格密度不低于主面^[1,10].

1.3 界面接触

钢管与混凝土界面法线方向的接触采用硬接触,即接触面的压力可以在界面间传递.当接触应力为 0 时,允许接触体相互脱离.切线方向的接触采用 Coulomb 摩擦模型,模拟界面剪应力的传递.采用允许弹性滑动的公式计算,在滑动中界面剪应力保持临界值不变,钢与混凝土界面摩擦系数取 0.6^[12-13].

1.4 边界条件

模型沿柱轴线方向的一端为固定端,约束表面节点的所有自由度;另一端为加载端,仅保留柱表面节点轴向(Z 方向)和剪切方向(Y 方向)的平动自由度,约束其他自由度.核心混凝土脱空通过在钢管单元和混凝土单元之间设置间隙模拟.建立的钢管混凝土纯剪及压剪构件有限元模型,如图 1 所示.

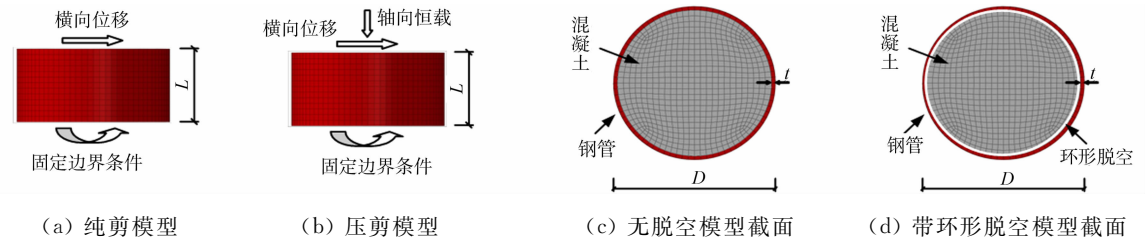


图 1 钢管混凝土受剪构件有限元模型

Fig. 1 FEM model of shear CFST members

1.5 模型验证

通过已有试验研究结果^[14-15]对该有限元模型进行验证.有限元计算时,首先,在加载端表面施加恒

定的轴向压力;然后,通过在加载端施加Y方向的位移模拟横向荷载加载,全程采用位移控制的静力加载方式.荷载(P)-位移(Δ)关系曲线及受剪承载力的有限元计算($V_{u,c}$)与试验结果($V_{u,e}$)的对比情况,如图2所示.由图2可知:有限元计算结果曲线与试验结果吻合良好,所有计算值与试验值比值的平均值为1.006,均方差为0.005.建立的有限元模型可用于预测钢管混凝土的受剪性能.

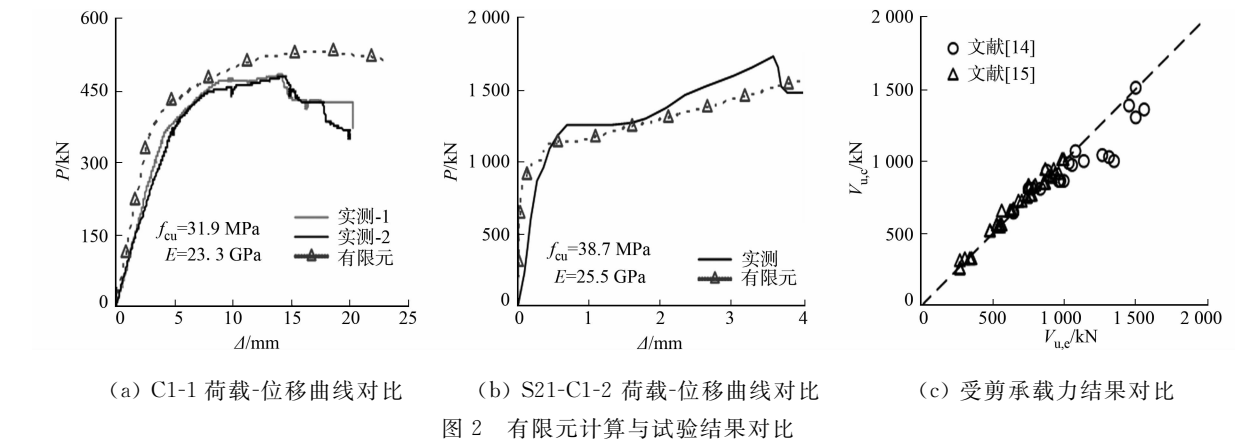


图2 有限元计算与试验结果对比

2 有限元计算过程与结果分析

2.1 数值模型构件的参数设计

构件脱空率的计算方法^[16-17]为

$$\chi = g/D. \tag{1}$$

式(1)中: χ 为构件脱空率; D 为钢管的外径; g 为脱空值,取 $g=2d$, d 为脱空处核心混凝土边缘到钢管内壁的垂直距离.

为了研究脱空对圆钢管混凝土构件受剪性能的影响,设计一组圆钢管混凝土数值模型构件.基于典型试件模型(图1),进行系统参数分析,结果如表1所示.表1中:编号的数字表示剪跨比,N表示有轴压力,x表示带脱空; L 为试件长度; m 为剪跨比; n 为轴压比.典型模型构件的计算参数如下: $D=400$ mm;钢管壁厚 $t=10$ mm;混凝土标准立方体抗压强度 $f_{cu}=50$ MPa;混凝土弹性模量 $E_c=34.5$ GPa;钢材屈服强度 $f_y=345$ MPa;钢材弹性模量 $E_s=20.6$ GPa;混凝土和钢管钢材的弹性阶段泊松比分别取0.2和0.3.

2.2 破坏形态分析

在纯剪和压剪作用下,钢管混凝土构件的典型破坏形态(图放大2倍),如图3所示.由图3可知:当 $m=0.15$ 时,纯剪构件(C0.15)和压剪构件(C0.15N)均出现剪切破坏特征,构件发生明显的剪切变形,且轴压力对构件破坏形态的影响不显著,这主要是由于构件长细比较小,即使在较大的轴压力作用下,也不易发生钢管局部屈曲现象;当 $m=0.5$ 时,纯剪构件(C0.5)和压剪构件(C0.5N)破坏的同时,还表现出弯曲和剪切破坏的特征,构件最终由于固定端附近钢管发生局部向外鼓曲而破坏,且压剪构件(C0.5N)的钢管局部屈曲现象更为显著,这主要是由于轴力的

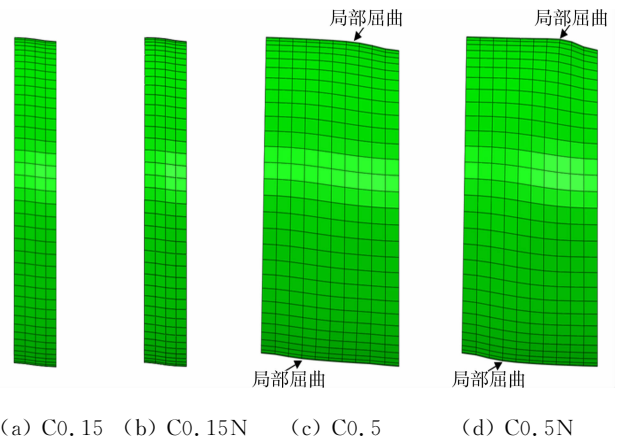


图3 典型试件破坏形态

Fig.3 Failure modes of typical specimens

存在所造成.计算得到的钢管变形与核心混凝土的变形基本完全一致,即使在钢管发生局部屈曲后,两种材料之间仍未出现相互脱离的现象,体现了良好的共同工作性能.

2.3 荷载-变形关系

计算的钢管混凝土典型脱空构件的剪力(V)-挠度(Δ)关系曲线,如图 4 所示. 构件外钢管与核心混凝土的内力分配-剪切变形全过程关系曲线,如图 5 所示.

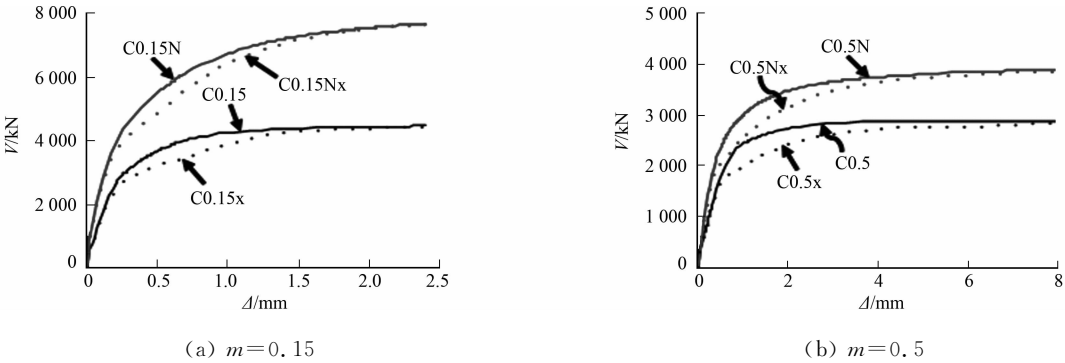


图 4 计算脱空构件的剪力-挠度曲线

Fig. 4 Simulation shear force-deflection curves of specimens with gaps

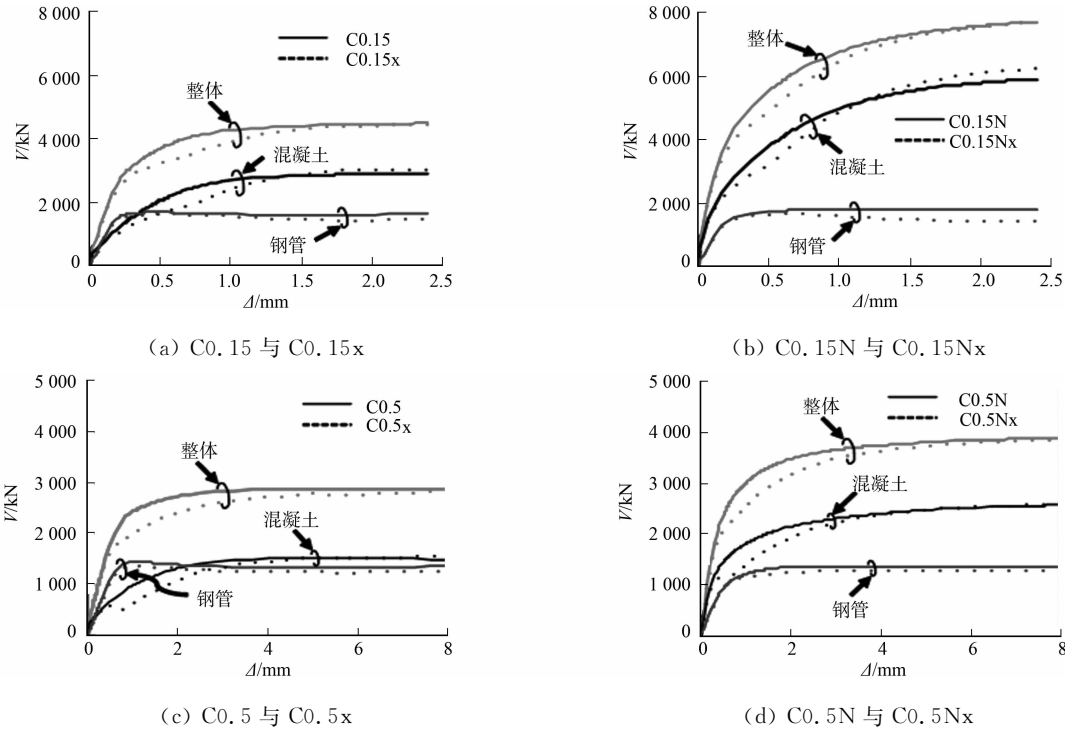


图 5 外钢管与核心混凝土的内力分配

Fig. 5 Internal force distribution between steel tube and core concrete

由图 4 可知:对于 $m=0.15$ 和 $m=0.5$ 的构件,脱空对其剪力-挠度曲线的影响趋势相近. 在初始加载阶段,构件处于弹性工作阶段,脱空构件与无脱空构件的剪力-挠度曲线几乎重合. 此阶段,外钢管与核心混凝土各自工作,不存在相互作用,脱空对该阶段各部分受力影响不明显. 当剪力-挠度曲线开始呈非线性转折,进入弹塑性工作阶段,脱空构件的剪力-挠度相比无脱空构件出现了更为明显的拐点,且相同挠度下对应的总剪力下降.

由图 5 可知:整体剪力下降程度与核心混凝土分配剪力下降程度接近,而钢管承担剪力下降微小. 主要原因是由于脱空导致核心混凝土缺乏外钢管的有效约束,其强度显著低于约束状态下的混凝土强度;而脱空对外钢管承载力的影响程度相比于核心混凝土则小得多. 随着挠度的进一步增大,构件变形以塑性变形为主,进入塑性工作阶段. 此阶段核心混凝土产生明显的横向膨胀变形,并最终与外钢管接触产生相互作用,承载力又逐渐恢复并有所提高,使脱空构件对应的剪力-挠度曲线逐渐接近无脱空构件的曲线.

综上所述可知,脱空削弱了构件弹塑性工作阶段(即核心混凝土与外钢管接触并产生相互作用前)

的抗剪性能.同时,脱空也降低了外钢管的抗剪承载力,但影响相对较小.

2.4 受剪承载力

典型构件受剪承载力 V_u (脱空及非脱空构件平均剪应变 γ 达到 0.01ϵ 对应的抗剪强度值) 的有限元计算结果,如图 6 所示.由图 6 可知:当剪跨比 $m=0.15$,脱空纯剪构件 C0.15x 的 V_u 相比无脱空构件 C0.15 降低了 13.9%,脱空压剪构件 C0.15Nx 的 V_u 相比无脱空构件 C0.15N 降低了 10.8%;当剪跨比 $m=0.5$,脱空纯剪构件 C0.5x 的 V_u 相比无脱空构件 C0.5 降低了 11.4%,脱空压剪构件 C0.5Nx 的 V_u 相比无脱空构件 C0.5N 降低了 9.1%.

可见,脱空缺陷的存在降低了构件的受剪承载力.对比同剪跨比试件可知,随轴压比的增加,脱空构件受剪承载力的下降幅度减小.主要原因是轴压力的施加使核心混凝土在受剪前发生横向变形,使压剪共同作用下的核心混凝土比纯剪时更早与外钢管发生接触,并产生相互作用.因此,适当的轴压比可减轻脱空对构件受剪承载力的削弱作用.同时,脱空对剪跨比较大构件的受剪承载力影响相对较小.这主要是由于剪跨比较大构件的破坏形态更偏向弯曲破坏特征,其承载力的组成中钢管部分所占的比例更大,因此,核心混凝土脱空造成的影响较小.

2.5 钢-混凝土接触应力

脱空及非脱空构件达到受剪承载力时的外钢管与核心混凝土的接触应力(p)云图,如图 7 所示.由图 7 可知:对于 $m=0.15$ 的脱空纯剪构件 C0.15x,在达到受剪承载力时,外钢管与核心混凝土还处于隔离状态,界面任意点的接触应力为 0;对于 $m=0.15$ 的脱空压剪构件 C0.15Nx,轴压力的作用使构件达到受剪承载力时,外钢管与核心混凝土沿加载斜对角线产生接触应力,但接触应力的大小与分布均明显小于对应的无脱空压剪构件 C0.15N.对于 $m=0.5$ 的脱空纯剪构件 C0.5x 和压剪构件 C0.5Nx,达到构件受剪承载力时,外钢管与核心混凝土沿加载斜对角线产生接触应力,脱空压剪构件 C0.5Nx 对应的接触应力大小和分布范围均大于脱空纯剪构件 C0.5x,但比相应无脱空构件仍相对较小.

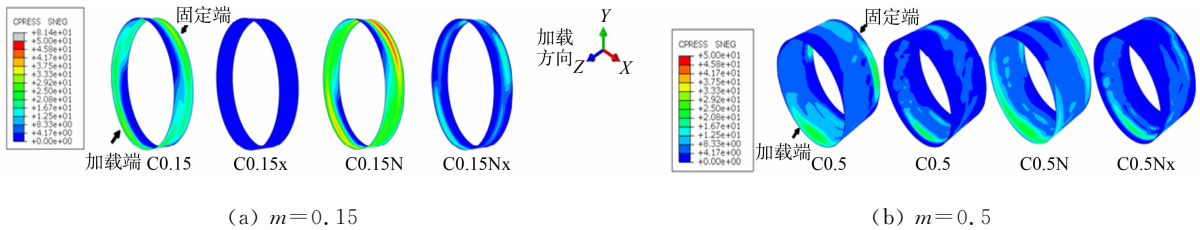


图 6 脱空与无脱空构件的受剪承载力对比
Fig. 6 Comparison of shear strength between CFST members with and without gap

图 7 外钢管-核心混凝土接触应力分布 (单位: MPa)
Fig. 7 Distribution of contact stress between steel tube and core concrete (unit: MPa)

3 受剪承载力简化计算方法

3.1 影响参数分析

不同脱空率构件的受剪承载力系数(SI)与轴压比(n)关系曲线,如图 8 所示.为便于比较,受剪承载力系数 SI 定义为

$$SI = \tau_u / \tau_{u, \text{nogap}}. \tag{2}$$

式(2)中: τ_u 和 $\tau_{u, \text{nogap}}$ 分别为带脱空和无脱空构件的极限剪应力,定义为 $\gamma=0.01\epsilon$ 时, τ - γ 关系曲线对应的剪应力.

由图 8 可知:不同脱空率(χ)条件下,SI 值随着轴压比 n 的变化趋势有所不同.当 $\chi \leq 0.2\%$ 时,SI 值随着 n 的增大近似呈线性增大趋势,且 χ 越大,SI 值上升的幅度越大.当脱空率较小时,随着轴压比的增加,核心混凝土受压膨胀变形加快,膨胀后的混凝土与钢管接触,提前进入共同工作状态.因此,SI

值随着轴压比增加而呈增大趋势.同时,脱空率越大,后期上升幅度越明显,从而 SI 值的上升幅度也越大.当 $\chi \geq 0.3\%$ 时,SI 值随着 n 的增大略有降低,但下降幅度较小.此现象是由于当脱空率达到一定程度时,外钢管与核心混凝土在构件达到受剪承载力时,仍处在独立工作状态,因此,除核心混凝土的横截面积和相应的受剪承载力随脱空率的增大有所减小外,脱空造成的影响不随轴压比的增大而持续增大.

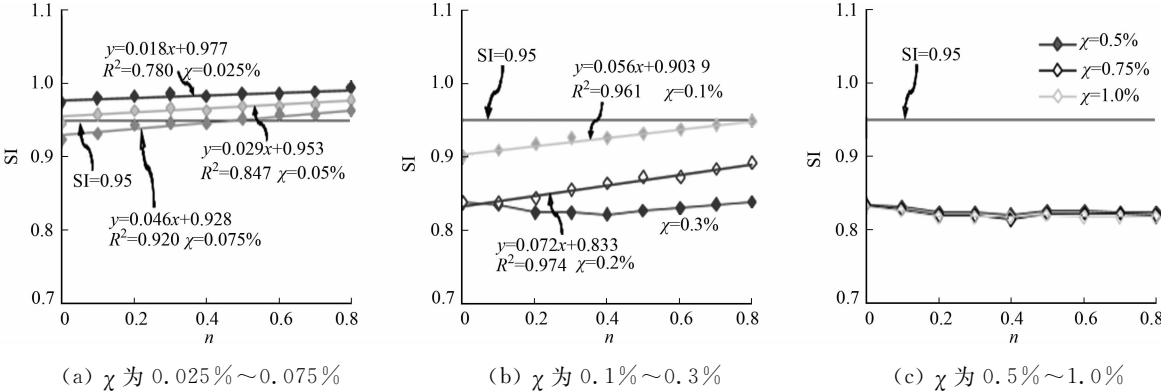


图 8 不同脱空率条件下 SI- n 关系

Fig. 8 SI- n relationship under different gap ratios

3.2 简化计算公式

由图 8 可知,钢管混凝土构件的承载力计算系数(γ_g)可近似表达为

$$\gamma_g = \begin{cases} an + b, & 0 \leq \chi \leq 0.2\%, \\ \text{线性插值}, & 0.2\% < \chi < 0.3\%, \\ c, & 0.3\% \leq \chi \leq 1.0\%. \end{cases} \tag{3}$$

当考虑轴压力影响时,需对 γ_g 进行调整.式(3)中,斜率 a 和 b 值与脱空率 χ 的关系,如图 9 所示.据此可回归出 a 和 b 的近似计算式为

$$a = -18\,909\chi^2 + 73.83\chi, \tag{4}$$

$$b = 9\,534\chi^2 - 103.07\chi + 1. \tag{5}$$

同时,式(3)中的 c 可计为 $\chi = 0.2\%$ 时的 b 值,即为 0.836.因此,将式(4),(5)及 $c = 0.836$ 带入式(3),可得带脱空缺陷的圆钢管混凝土压剪构件的承载力计算系数(γ_g)表达式.

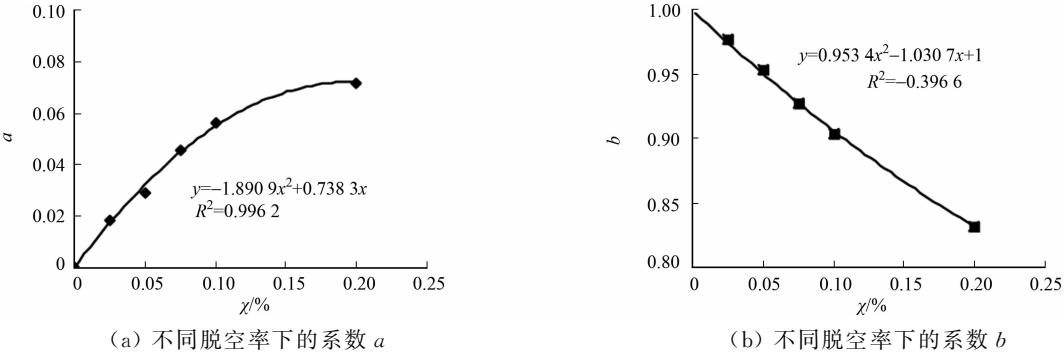


图 9 式(3)系数与脱空率的关系曲线

Fig. 9 Curves between coefficients in equation (3) and gap ratio

综上所述,在文中研究参数范围内,即 f_{cu} 为 30~90 MPa, f_y 为 345~420 MPa, α 为 0.05~0.15, m 为 0.1~6.0, $\chi \leq 1\%$, n 为 0~0.8 时,带脱空缺陷圆钢管混凝土构件的受剪承载力计算式为

$$V_{u, \text{Gap}} = \gamma_g \cdot V_u. \tag{6}$$

4 结论

- 1) 脱空缺陷导致钢管混凝土短柱在压剪作用下的受剪承载力下降.当脱空率不超过 0.2% 时,受剪承载力下降幅度随着轴压比的增加而降低.
- 2) 当剪跨比不超过 0.5 时,脱空缺陷导致的钢管混凝土短柱受剪承载力下降幅度随着剪跨比的增

大而减小.

3) 相比纯剪作用,脱空缺陷对钢管混凝土短柱压剪作用下受剪承载力的影响程度呈下降趋势.

4) 提出了考虑脱空率和轴压比影响的带脱空钢管混凝土压剪构件的受剪承载力简化计算式.

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践[M]. 3版. 北京:科学出版社,2016:12-15,109-112.
- [2] HAN Linhai, HOU Chuanchuan, WANG Qingli. Behavior of circular CFST stub columns under sustained load and chloride corrosion[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103: 23-36. DOI: 10. 1016/j. jcsr. 2014. 07. 021.
- [3] DUARTE A P C, SILVA B A, SILVESTRE N, *et al.* Experimental study on short rubberized concrete-filled steel tubes under cyclic loading[J]. Composite Structures, 2016, 136: 394-404. DOI: 10. 1016/j. compstruct. 2015. 10. 015.
- [4] LIAO Feiyu, HAN Linhai, HE Shanhu. Behavior of CFST short column and beam with initial concrete imperfection: Experiments[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(12): 1922-1935. DOI: 10. 1016/j. jcsr. 2011. 06. 009.
- [5] 杨世聪, 王福敏, 渠平. 核心混凝土脱空对钢管混凝土构件力学性能的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27(3): 360-365, 486.
- [6] 刘夏平, 唐述, 杨作用, 等. 脱空钢管混凝土短柱偏心受压破坏形态试验研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2010, 9(3): 40-44. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-4229. 2010. 03. 010.
- [7] LIAO Feiyu, HAN Linhai, TAO Zhong. Behavior of CFST stub columns with initial concrete imperfection: Analysis and calculations[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 70(1): 57-69. DOI: 10. 1016/j. tws. 2013. 04. 012.
- [8] 叶勇, 李威, 陈锦阳. 考虑脱空的方钢管混凝土短柱轴压性能有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊 1): 324-329. DOI: 10. 14006/j. jzjgxb. 2015. S1. 049.
- [9] HAN Linhai, YE Yong, LIAO Feiyu. Effects of core concrete initial imperfection on performance of eccentrically loaded CFST columns[J]. Journal of Structural Engineering - ASCE, 2016, 142(12): 04016132. DOI: 10. 1061/(ASCE)ST. 1943-541X. 0001604.
- [10] 叶勇, 韩林海, 陶忠. 脱空对圆钢管混凝土受剪性能的影响分析[J]. 工程力学, 2016, 33(增刊 1): 62-66. DOI: 10. 6052/j. issn. 1000-4750. 2015. 05. S010.
- [11] 虎良, 何铭华, 辛克贵, 等. 软化特征可控的双参指数型约束混凝土本构及其应用[J]. 工程力学, 2013, 30(12): 132-137. DOI: 10. 6052/j. issn. 1000-4750. 2012. 08. 0577.
- [12] BALTAÏ P, GJELSVIK A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress[J]. Journal of Materials in Civil Engineering-ASCE, 1990, 2(1): 46-49. DOI: 10. 1061/(ASCE)0899-1561(1990)2:1(46).
- [13] 刘威, 韩林海. ABAQUS 分析钢管混凝土轴压性能的若干问题研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(增刊 1): 157-160.
- [14] 郭淑丽. 钢管混凝土柱抗剪力性能研究[D]. 福州:福州大学, 2008: 25-34.
- [15] 徐春丽. 钢管混凝土柱抗剪承载力试验研究[D]. 济南:山东科技大学, 2004: 20-27.
- [16] HAN Linhai, HOU Chuanchuan, ZHAO Xiaoling, *et al.* Behaviour of high-strength concrete filled steel tubes under transverse impact loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 92(1): 25-39. DOI: 10. 1016/j. jcsr. 2013. 09. 003.
- [17] ROMERO M L, ESPINOS A, PORTOLÉS J M, *et al.* Slender double-tube ultra-high strength concrete-filled tubular columns under ambient temperature and fire[J]. Engineering Structures, 2015, 99: 536-545. DOI: 10. 1016/j. engstruct. 2015. 05. 026.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)